

## ФОРМИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

*У роботі досліджена можливість створення випробувальних імпульсів струму різної форми. Визначено співвідношення параметрів схеми для формування імпульсів струму із квазіпостійною вершиною й імпульсів, що мають мінімальну амплітуду коливань.*

*В работе исследована возможность создания испытательных импульсов тока различной формы. Определены соотношения параметров схемы для формирования импульсов тока с квазипостоянной вершиной и импульсов, имеющих минимальную амплитуду колебаний.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Для испытания технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения широко используются генераторы импульсов тока, сооружаемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). В крупных испытательных центрах обычно имеется несколько ЕНЭ с различными уровнями напряжения зарядки и запасаемой энергии, которые используются для формирования импульсных воздействий, с различными амплитудно-временными параметрами (АВП). Существенно расширить возможности испытательных комплексов за счет расширения спектра АВП формируемых импульсов тока позволяет параллельная работа нескольких ЕНЭ на общую нагрузку. Такой подход к использованию испытательных комплексов требует исследования взаимосвязи параметров ЕНЭ и формируемых импульсов тока.

**Анализ публикаций.** Параллельной работе нескольких ЕНЭ на одну нагрузку посвящен ряд публикаций [1–5]. В [1] приведены результаты численного и экспериментального исследования переходного процесса при параллельной работе двух генераторов импульсов напряжения на активно-индуктивную нагрузку. Для формирования тока молнии (длительность фронта 2 мкс, длительность импульса 50 мкс) в работе было исследовано замыкание нагрузки. В [2] представлено аналитическое решение системы операторных уравнений, описывающих переходный процесс при работе генераторов больших импульсных токов с корректирующей цепью на RL-нагрузку. В расчетной схеме генератор и параллельно включенная корректирующая цепь представлены RLC-звеньями, что также соответствует эквивалентной схеме совместной работы ЕНЭ на общую нагрузку. Аналитическое выражение для тока в нагрузке получено при условии, что активное сопротивление генератора и корректирующей цепи. В [3] показано, что при параллельной работе двух ЕНЭ, в зависимости от соотношений параметров разрядной цепи возможно формирование пяти видов импульса тока. Работы [4–5] посвящены исследованию

возможности формирования одного из характерных видов, широко используемого при испытаниях – импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений (монотонный импульс тока).

Как видно из рассмотренных источников, анализу переходных процессов параллельной работы двух ЕНЭ уделяется значительное внимание. Однако, при возможности формирования ряда характерных импульсов тока, наиболее полно рассмотрены лишь вопросы генерирования монотонных импульсов, что предопределяет интерес к исследованию процесса формирования других форм импульсов тока.

**Целью настоящей работы** является анализ условий формирования импульса тока с квазипостоянной вершиной и импульса тока с минимальной амплитудой колебаний.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему параллельной работы двух ЕНЭ на общую активно-индуктивную нагрузку, приведенную на рис. 1.

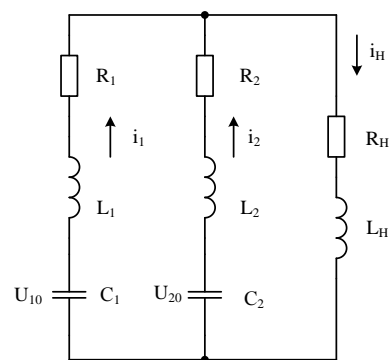


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема параллельной работы двух ЕНЭ

Можно показать, что операторное изображение по Лапласу импульса тока в нагрузке имеет вид [6]

$$I_H(p) = \frac{p^2 \cdot A_2 + p \cdot A_1 + A_0}{p^4 \cdot B_4 + p^3 \cdot B_3 + p^2 \cdot B_2 + p \cdot B_1 + B_0}, \quad (1)$$

где  $A_2 = U_{10} \cdot L_2 + U_{20} \cdot L_1$ ;

$$A_1 = U_{10} \cdot R_2 + U_{20} \cdot R_1; \quad A_0 = \frac{U_{10}}{C_2} + \frac{U_{20}}{C_1};$$

$$B_4 = L_1 \cdot L_H + L_1 \cdot L_2 + L_2 \cdot L_H;$$

$$B_3 = R_1 \cdot (L_H + L_2) + R_2 \cdot (L_H + L_1) + R_H \cdot (L_1 + L_2);$$

$$B_2 = \frac{L_H + L_2}{C_1} + \frac{L_H + L_1}{C_2} + R_1 \cdot R_H + R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_H;$$

$$B_1 = \frac{R_H + R_2}{C_1} + \frac{R_H + R_1}{C_2}; \quad B_0 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2},$$

где  $U_{10}$ ,  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $R_1$  – соответственно напряжение зарядки, емкость, индуктивность и активное сопротивление ЕНЭ1;  $U_{20}$ ,  $C_2$ ,  $L_2$ ,  $R_2$  – соответственно напряжение зарядки, емкость, индуктивность и активное сопротивление ЕНЭ2;  $L_H$ ,  $R_H$  – индуктивность и активное сопротивление нагрузки.

Учитывая затухающий характер переходных процессов в схеме, приведенной на рис. 1, можно показать, что импульс тока во временной области математически описывается одним из следующих выражений:

$$i(t) = (Q_1 + Q_2 \cdot t) \cdot e^{-\alpha_1 t} + (Q_3 + Q_4 \cdot t) \cdot e^{-\alpha_2 t};$$

$$i(t) = (Q_1 + Q_2 \cdot t) \cdot e^{-\alpha_1 t} + Q_3 \cdot e^{-\alpha_2 t} + Q_4 \cdot e^{-\alpha_3 t};$$

$$i(t) = (Q_1 + Q_2 \cdot t) \cdot e^{-\alpha_1 t} + Q_3 \cdot e^{-\alpha_2 t} \sin(\omega \cdot t - \alpha_2);$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^4 Q_k \cdot e^{-\alpha_k t};$$

$$i(t) = Q_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} + Q_2 \cdot e^{-\alpha_2 t} + Q_3 \cdot e^{-\alpha_3 t} \sin(\omega \cdot t - \alpha_3);$$

$$i(t) = Q_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega \cdot t - \alpha_1) + Q_2 \cdot e^{-\alpha_2 t} \sin(\omega \cdot t - \alpha_2),$$

где  $Q_1 - Q_4$ ,  $\alpha_1 > 0, \dots, \alpha_4 > 0$  – коэффициенты, зависящие от параметров схемы.

Естественно, различные соотношения между коэффициентами математического описания порождают широкую гамму форм импульсов, которые могут быть использованы в качестве испытательных. Для определения взаимосвязи форм импульса тока и параметров разрядной цепи был проведен анализ переходного процесса в безразмерном виде [3]. Было показано, что переходный процесс в схеме, показанной на рис. 1, зависит от следующих безразмерных параметров:

$$r_1 = R_1 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}, \quad r_2 = R_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}, \quad r_H = R_H \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} -$$

безразмерные аналоги активных сопротивлений;

$$I_1 = \frac{i_1}{U_1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_2 = \frac{i_2}{U_1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_H = \frac{i_H}{U_1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} -$$

безразмерные аналоги токов;

$$L_{21} = \frac{L_2}{L_1}, \quad L_{H1} = \frac{L_H}{L_1}, \quad C_{21} = \frac{C_2}{C_1}, \quad U_{21} = \frac{U_2}{U_1} -$$

безразмерные аналоги индуктивностей ЕНЭ2 и нагрузки, емкости и напряжения зарядки ЕНЭ2.

С практической точки зрения регулировать параметры импульсов тока целесообразно

изменением величины активного сопротивления и индуктивности ЕНЭ2, который имеет меньший уровень напряжения зарядки. На рис. 2 показаны области формирования различных форм импульса тока в нагрузке в зависимости от соотношения безразмерных параметров ветви ЕНЭ2  $r_2$  и  $L_{21}$  при следующих значениях остальных безразмерных параметров:  $r_H = 0,5$ ;  $L_{H1} = 3$ ;  $C_{21} = 100$ ;  $U_{21} = 0,1$ ;  $r_1 = 1$ .

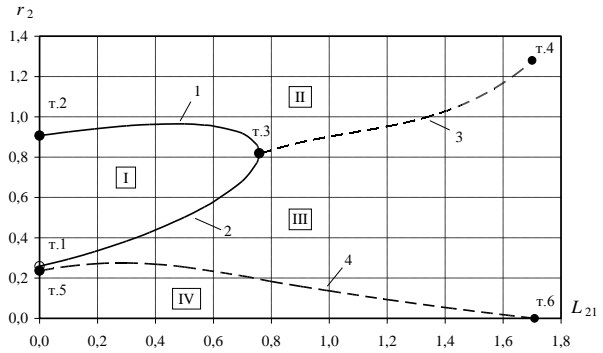


Рис. 2. Области формирования различных форм импульсов

Область монотонности I, ограниченная верхней 1 и нижней 2 границей, рассмотрена в [3-5]. Ей принадлежат точки т.1, т.2 и т.3.

В областях II и III импульс тока имеет колебательный характер на спаде. Причем, при перемещении в плоскости  $L_{21}0r_2$ , из области II в область III параллельно оси  $0r_2$  находится точка, в которой импульс тока имеет наименьшую амплитуду колебаний (импульс минимальной амплитуды колебаний). Совокупность таких точек представлена кривой 3, ограниченной точками т.3 и т.4. Точка т.4 – крайняя точка, для которой проведен расчет. Такой импульс может быть использован вместо монотонного импульса, если это допускается условиями испытаний, например импульс А- и D-составляющих тока молнии [7]. Описание кривой 3 для различных соотношений параметров элементов схемы приведено в табл. 1.

При перемещении в плоскости  $L_{21}0r_2$  параллельно оси  $0r_2$  из области III в область IV, колебания перемещаются со спада на фронт импульса тока. При этом имеется точка, в которой значения максимума колебания и максимального значения тока в импульсе имеют одинаковую величину (импульс с квазипостоянной вершиной). Совокупность таких точек представлена кривой 4, ограниченной точками т.5 и т.6. Такой импульс может быть использован например для формирования В- и С-составляющих тока молнии [7]. Описание кривой 4 для различных соотношений параметров элементов схемы приведено в табл. 2.

Характерные импульсы тока, соответствующие различным областям, приведены на рис. 3. Импульсы рассчитаны при  $L_{21} = 0,8$ . Импульс вида 1 получен при  $r_2 = 0,1$  и соответствует области IV (рис. 2) – области импульсов с колебанием на фронте.

Таблица 1

Номер точки	$r_2$	$L_{21}$	Уравнение кривой 3
$C_{21} = 100; L_{H1} = 3; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.3	0,819	0,7585	$r_2 = 0,8526 \cdot L_{21}^3 - 2,7656 \cdot L_{21}^2 + 3,2342 \cdot L_{21} - 0,4195$
т.4	1,28	1,7	
$C_{21} = 100; L_{H1} = 5; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.3	1,235	1,5	$r_2 = -0,0282 \cdot L_{21}^2 + 0,3635 \cdot L_{21} + 0,7514$
т.4	1,57	2,92	
$C_{21} = 100; L_{H1} = 7; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.3	1,561	2,197	$r_2 = -0,0364 \cdot L_{21}^2 + 0,4123 \cdot L_{21} + 0,8329$
т.4	1,9	4	
$C_{21} = 1000; L_{H1} = 3; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.3	0,72	0,5694	$r_2 = -0,0636 \cdot L_{21}^2 + 0,4947 \cdot L_{21} + 0,4528$
т.4	1,29	2,5	

Таблица 2

Номер точки	$r_2$	$L_{21}$	Уравнение кривой 4
$C_{21} = 100; L_{H1} = 3; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.5	0,237	0	$r_2 = 0,1618 \cdot L_{21}^3 - 0,4915 \cdot L_{21}^2 + 0,2312 \cdot L_{21} + 0,2399$
т.6	0	1,7088	
$C_{21} = 100; L_{H1} = 5; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.5	0,3961	0	$r_2 = 0,0349 \cdot L_{21}^3 - 0,1689 \cdot L_{21}^2 + 0,0594 \cdot L_{21} + 0,4077$
т.6	0	2,9229	
$C_{21} = 100; L_{H1} = 7; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.5	0,53	0	$r_2 = -0,0061 \cdot L_{21}^4 + 0,0652 \cdot L_{21}^3 - 0,2238 \cdot L_{21}^2 + 0,1143 \cdot L_{21} + 0,5302$
т.6	0	4,2825	
$C_{21} = 1000; L_{H1} = 3; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$			
т.5	0,25296	0	$r_2 = -0,0422 \cdot L_{21}^4 + 0,2563 \cdot L_{21}^3 - 0,5066 \cdot L_{21}^2 + 0,2206 \cdot L_{21} + 0,2548$
т.6	0	2,4891	

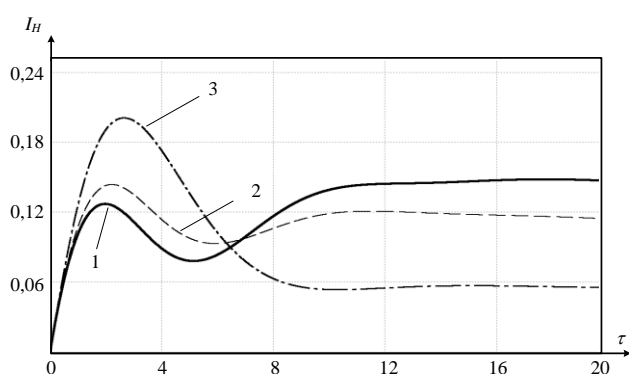


Рис. 3. Характерные формы импульсов тока

Импульс вида 2 получен при  $r_2 = 0,3$  и соответствует области III (рис. 2) – области импульсов с колебанием на спаде. Импульс вида 3 получен при  $r_2 = 1,2$  и соответствует области II (рис. 2) – области импульсов с колебанием на спаде.

Характерные импульсы тока, соответствующие граничным кривым различных областей, приведены

на рис. 4. Импульс вида 1 соответствует кривой 4 (рис. 2) – кривой импульсов с квазипостоянной вершиной. Импульс вида 2 соответствует кривой 3 (рис. 2) – кривой импульсов минимальной амплитуды колебаний.

Следует отметить, что с увеличением  $L_{21}$  происходит увеличение амплитуды колебаний импульсов для импульса минимальной амплитуды колебаний и величины "провала" для импульса с квазипостоянной вершиной (рис. 4). При этом имеют место следующие зависимости:

$$\text{для } C_{21} = 100; L_{H1} = 3; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$$

$$\delta = 18,015 \cdot L_{21}^2 - 19,778 \cdot L_{21} + 4,7514; \quad (2)$$

$$\Delta = 3,1461 \cdot L_{21}^2 + 43,272 \cdot L_{21} - 1,0367; \quad (3)$$

$$\text{для } C_{21} = 100; L_{H1} = 5; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$$

$$\delta = 8,3979 \cdot L_{21}^2 - 16,534 \cdot L_{21} + 5,8363; \quad (4)$$

$$\Delta = -5,606 \cdot L_{21}^3 + 22,77 \cdot L_{21}^2 + 12,63 \cdot L_{21} - 1,287; \quad (5)$$

$$\text{для } C_{21} = 100; L_{H1} = 7; U_{21} = 0,1; r_1 = 1; r_H = 0,5$$

$$\delta = 5,9108 \cdot L_{21}^2 - 18,269 \cdot L_{21} + 11,375; \quad (6)$$

$$\Delta = 1,01 \cdot L_{21}^4 - 10,5 \cdot L_{21}^3 + 33,2 \cdot L_{21}^2 - 5,03 \cdot L_{21} + 0,2, \quad (7)$$

где относительное отклонение величины экстремумов от их среднего значения  $\delta = 200 \frac{I_{e3} - I_{e2}}{I_{e2} + I_{e3}} \%$ ;

$I_{e2}$ ,  $I_{e3}$  – соответственно значения второго и третьего экстремумов импульса тока;

$\Delta = 100 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \%$ ;  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – соответственно

максимальное значения тока и значение первого минимума импульса тока (см. рис. 4).

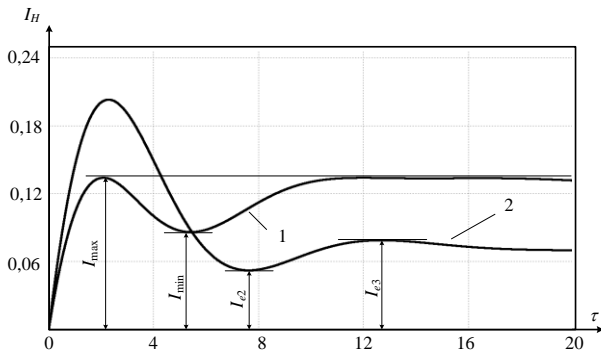


Рис. 4. Граничные импульсы тока

В качестве примера применения полученных в работе соотношений, определим безразмерные параметры для формирования импульса тока с квазипостоянной вершиной при допуске на "провал" не более 10% при следующих известных безразмерных параметрах:  $C_{21} = 100$ ;  $L_{H1} = 3$ ;  $r_H = 0,5$ ;  $U_{21} = 0,1$ ;  $r_1 = 1$ .

Задавшись  $\Delta = 10\%$  и решая нелинейное уравнение (3) находим  $L_{21} = 0,25$ . Далее по соответствующей формуле, приведенной в табл. 2 определяем  $r_2 = 0,27$ . Численное моделирование с помощью Micro-Cap 8 схемы, приведенной на рис. 1, при вычисленных значениях безразмерных параметров показывает, что величина "провала" не превышает 6%.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что при параллельной работе двух емкостных накопителей энергии на общую активно-индуктивную нагрузку возможно формирование специальных испытательных импульсов тока: с квазипостоянной вершиной и минимальной амплитудой колебаний.

2. Получены соотношения для выбора параметров разрядной цепи, при которых формируются специальные испытательные импульсы тока.

Материалы статьи могут быть использованы для исследования формирующих свойств схем с большим количеством емкостных накопителей энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов М.И. Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем

нагрузки для получения больших импульсных токов молнии / Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков : НТУ "ХПИ". – №4. – 2004. – С. 37 – 45.

2. Баранов М.И. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии / М.И. Баранов, Н.Н. Игнатенко // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков : НТУ "ХПИ". – №49. – 2005. – С. 3 – 14.

3. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ "ХПИ". – №34. – 2007. – С. 79 – 85.

4. Олейник О. В. Формирование аperiodического импульса при разряде двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / О.В. Олейник, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ "ХПИ". – 2009. – №11. – С. 141 – 148.

5. Петков А.А. Формирование импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений при параллельной работе двух емкостных накопителей / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №3. – С. 65 – 69.

6. Петков А.А. Формализация описания структур разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №1. – С. 73 – 77.

7. MIL-STD-464A. Department of defense interface standard. Electromagnetic environmental effects requirements for systems – AMSC F7489, Area EMCS. – 2002. – 121 P.

Поступила 23.11.2009

Петков А.А., к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"

тел./факс (057) 707-62-80,

E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua